



# 고성능 직조형 복합재료

변준형, 엄문광

한국기계연구원 재료기술연구소

## 1. 서론

직조형 복합재료(textile reinforced composite materials)는 섬유 기술로 제조된 섬유 보강 구조체(프리폼, preform)를 사용한 구조용 고성능 복합재료를 말한다. 섬유 자체의 경량 특성, 유연성, 강도 및 인성(toughness) 등이 조합된 특수한 성질은 1920년대의 항공기 날개 구조에서부터 1950년대의 탄소/탄소 복합재의 노즈콘(nose cone)에 이르기까지 관심을 끄는 보강재료로 인식되어 왔다. 1980년대 중반부터 시작된 섬유 복합재료에 대한 관심이 다시 나타나게 된 것은 고성능 복합재료를 개발하기 위하여 기존의 층상 복합재료로서는 달성하기 어려운 층 내부 및 층과 층 사이 강도의 현저한 향상과 내충격 및 내손상이 뛰어난 보강 구조에 대한 요구가 매우 높았기 때문이었다. 대형 구조의 부품에 복합재료의 적용이 확대됨에 따라 성능 향상 뿐만 아니라 구조의 일체화 기술 및 최종 제품의 형상에 가까운(near-net-shape) 제조기술의 필요성이 증가하고 있으며, 이에 따라 직조형 보강 구조가 더욱 관심을 끌고 있다.

본 논문에서는 복합재료 기술에 대한 일반적인 소개를 시작으로 보강재 구조로 사용되는 직조형 프리폼 기술 및 직조형 복합재료에 대한 제조기술을 소개함으로써 고성능 복합재료로서의 직조기술이 차지하는 중요성에 대하여 설명하고자 한다.

## 2. 복합재료

복합재료는 서로 다른 성질을 가지는 두 가지 이상의 재료를 거시적으로 혼합하여 각 재료에 의해서 얻을 수 없는 새로운 성질을 갖는 유용한 재료로 된 것을 말한다. 복합재료는 강화재와 기지재료로 구성되는데, 강화재는 대부분의 힘을 감당하며 기지재료는 섬유 사이의 힘을 전달하고 섬유를 둘러싸서 외부환경이나 마모로부터 보호하는 역할을 한다. 이러한 복합재료에 대한 예로는 무수한 세월을 거치며 자연에서 가장 적합한 구조로 발전된 동식물계의 뼈나 목재 등을 들 수 있으며, 인공적으로 제조된 최초의 복합재료는 고대 이집트에서 밀짚을 섞은 벽돌에서 찾아 볼 수 있다. 위에 열거한 예는 섬유가 포함되어 특성이 향상된 복합재료이며, 이 외에도 입자나 플레이크(flake) 등으로 특성을 강화시킬 수 있다. 위와 같이 보강재료의 형태에 따라 섬유강화 복합재료, 입자강화 복합재료, 플레이크강화 복합재료 등으로 분류할 수 있으며, 기지재료에 따라 고분자 복합재료, 금속 복합재료



복합재료는 기지재료에 따라 고분자 복합재료(1), 금속 복합재료(2), 세라믹 복합재료(3)로 분류될 수 있다. 보강재료는 섬유(1, 2), 입자, 플레이크(3) 등의 형태다.

Figure 1. 복합재료 분류.

및 세라믹 복합재료로 나누기도 한다. Figure 1은 보강재 및 기지재료의 형태와 종류에 따른 대표적인 복합재료를 보여주고 있다.

복합재료는 거의 모든 재료를 혼합함으로써 얻을 수 있기 때문에 선택할 수 있는 재료에 대한 제한이 없고 그 특성도 매우 다양하게 얻을 수 있으나, 보통 다음과 같은 일반적인 성질을 가진다. 복합재료는 견딜 수 있는 힘(강도)이 높고 딱딱하여 잘 휘지 않는 성질(높은 강성 혹은 탄성계수)이 있으며, 가벼운 섬유나 기지 재료를 사용할 때 강도 혹은 강성을 밀도로 나눈 값인 비강도 및 비강성이 매우 높다. 예를 들어, 항공기에 많이 사용되고 있는 일반적인 탄소섬유/고분자 복합재료의 경우는 섬유길이 방향의 강성은 강철의 70%이며, 인장강도는 4배 이상 높지만 강도 및 강성이 이 복합재료의 비중(1.55)으로 나눈 값인 비강성 및 비강도로 비교하면 강철의 3배 및 20배 이상이다. 즉, 강철의 1/3 및 1/20 무게로 같은 강도 및 강성을 가진다는 뜻이며, 특수한 성능을 만족시키기 위한 고성능 탄소섬유를 사용하는 경우에는 더 큰 특성 향상을 얻을 수 있다. 즉 복합재료는 “강철보다 강하고 알루미늄 보다 가벼운 소재”라는 말로써 간단히 설명할 수 있다.

이와 같은 장점 외에도, 복합재료는 진동흡수 능력, 피로강도 및 충격특성이 우수하며, 유리섬유를 사용할 때는 전기절연성이나 단열성이 우수하다. 또한, 탄소섬유와 아라미드 섬유는 열팽창계수가 마이너스 값을 가지기 때문에 온도에 따른 재료 변형을 없앨 수 있으므로 우주 구조물과 같이 높은 온도와 낮은 온도에서 동시에 사용되는 구조재로 많이 적용되고 있다. 특히, 우주선이나 우주왕복선의 경우는 성능을 유지한 상태에서 무게를 최대한 가볍게 하는 것이 중요하다. 즉, 무게를 가볍게 함으로써 추진 성능을 향상시키거나 추진 비용을 절감하고, 구조물의 무게가 가벼워진 만큼 다른 측정장비를 추가할 수 있다. 우주왕복선의 경우 무게를 1 kg 가볍게 하면 전체 비용을 4천만원 정도 절약할 수 있고, 민간 항공기의 경우는 1 kg 경량화에 100

만원 정도의 비용을 절감할 수 있기 때문에 항공·우주용 구조물이나 부품에 복합재료를 상당히 많이 적용하고 있다. 한 예로, 최근 우리에게 친숙한 라팔 전투기는 전체 무게의 20%가 복합재료이며, 유로파이터의 경우는 35%, F-22의 경우는 25%가 복합재료로 이루어져 있다. 복합재료의 무게가 가볍다는 것을 고려하여 부피로 환산하면 더 높은 구성 비율을 보인다. 또한, 민간 항공기의 경우 보잉사의 B777은 7%, 에어버스의 A340은 13%가 복합재료로 구성되어 있으며, 최근 개발되고 있는 보잉 B787과 에어버스 A380의 경우에도 복합재료가 40% 이상 사용되고 있어 복합재료의 적용비율은 새로운 항공기가 개발될 때마다 계속 증가하고 있는 추세이다.

이와 같은 복합재료의 장점을 최대한 활용하기 위한 연구 및 개발 노력의 대부분은 1965년 이후부터 이루어져 왔다. 그 후 높은 성능을 가지는 원재료의 개발과 함께 다양한 제조기술의 적용으로 복합재료 기술이 급속히 발전했으며, 이에 따라 자동차 산업, 항공 우주 산업, 선박 산업, 생체 의학(biomedical) 산업, 건설 산업 및 스포츠 산업에 이르는 다양한 분야에서 고성능 제품이 개발되고 있다. 현재, 복합재료는 여러 분야에서 재래의 재료를 대신하고 있을 뿐만 아니라, 복합재료만이 가질 수 있는 새롭고 유일한 응용 분야를 개척해 나가고 있다. 앞으로, 대형우주 구조물, 초음속기, 고속철도, 핵융합로 등 광범위한 분야에서 차세대를 지향한 선도적인 재료 기술 개발이 요구되고 있다. 이러한 분야에 응용되는 구조물은 가혹한 기계적, 열적 하중을 받을 뿐만 아니라 여러 방향의 복잡한 힘이 작용하기 때문에 고성능 재료의 개발이 필요하며 이와 동시에 기존의 재료를 대체하기 위해서는 가격 경쟁력이 있는 복합재료 제품의 개발이 필요하다.

### 3. 섬유 프리폼 제조 기술

복합재료 성형 방법과 밀접한 관계를 가지는 프

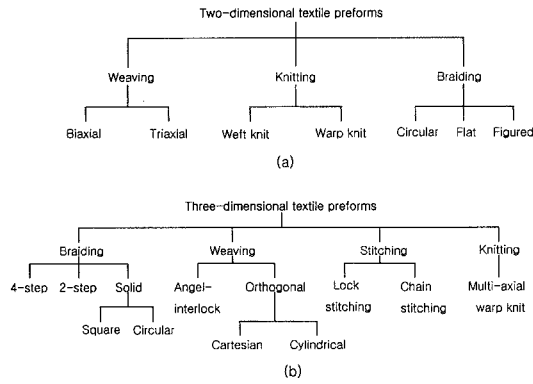


Figure 2. 섬유 프리폼 제조기술: (a) 2차원 프리폼; (b) 3차원 프리폼.

리폼 제조기술은 대부분 직조기술을 바탕으로 하고 있다. 일방향 프리프레그 테이프에 비하여 직물 프리폼이 가지는 장점은 복잡한 형상의 부품 성형이 가능하고, 생산성이 향상되며 손상 허용치가 증가한다는 것이다. 직물 프리폼은 Figure 2에서 보는 것처럼 섬유가 일체화되는 정도와 두께 방향 강화 정도에 따라 2차원 및 3차원 구조로 구분된다. 예를 들어, 기존의 제직, 제편, 브레이딩(*weaving, knitting, braiding*)을 보면 두께 방향의 섬유가 단지 섬유 직경의 2~3배 정도 깊이로 연결되기 때문에 섬유 관통으로 인한 강화 효과는 비록 일방향 적층 복합재료에 비하여 높지만, 그 절대값의 증가는 적은 편이다. 즉, 이런 직조 형태를 2차원 프리폼이라고 한다. 한편, 최근에 관심을 끌고 있는 3차원 프리폼의 경우에는 여러 방향의 섬유가 일체화된 구조이며 두께 방향으로 현저한 보강 효과를 줄 수 있다. 이런 2차원 혹은 3차원 직물 프리폼에 대한 다소 느슨한 정의는 프리폼의 실제 치수와는 무관한 것이다.

### 3.1. 2차원 직조 프리폼

#### 3.1.1. 제직 프리폼

제직 프리폼은 두 세트 이상의 섬유가 서로 다른 방향으로 교차하여 직조되는 구조인데, 길이 방향

의 섬유를 경사(*warp*), 폭 방향의 섬유를 위사(*filling* 혹은 *weft*)라고 한다. Figure 3은 대표적인 직교(*orthogonal*) weave 패턴을 보인 것이다. 제직 프리폼은 하나의 층으로 두 방향의 보강 효과를 줄 수 있으며 충격저항 특성도 향상된다. 또한, 적층 작업을 할 때 다루기 쉽고 생산성이 높기 때문에 구조용 복합재료 성형에 가장 많이 사용된다. 반면에, 면내 전단 특성이 낮고 섬유굴곡으로 인하여 길이 방향의 기계적 특성이 저하되는 단점이 있다. 한편, Figure 4와 같은 3축(*triaxial*) 제직 프리폼 같은 경우에는 세 세트가 섬유가 서로 60도의 각도로 교차하기 때문에 직교 weave에 비하여 재료 등방성이 향상되고 면내 전단 특성이 훨씬 높다. Figure 4 (b)의 경우는 길이 혹은 폭 방향의 기계적 특성을 향상시키기 위하여 섬유를 보강한 형태이고, Figure 4 (c)의 경우는 일반적인 형태의 삼축제직(*triaxial weave*)의 섬유 포함량을 증가시키기 위해 더 밀집된 섬유 구조로 된 것이다.

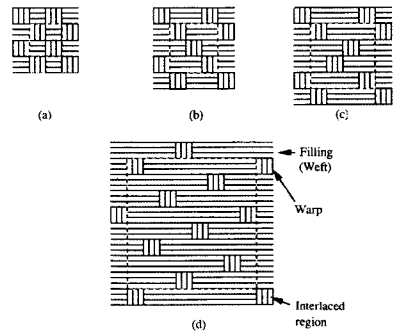


Figure 3. 직교 weave 구조: (a) 평직 (plain weave); (b) 능직 (twill weave); (c) 4매 주자직 (four-harness satin); (d) 8매 주자직 (eight-harness satin).

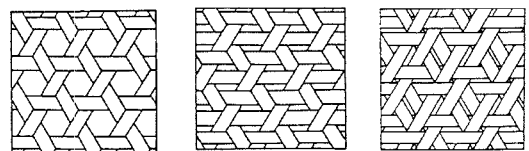


Figure 4. Triaxial weave: (a) basic triaxial weave; (b) stuffed basic triaxial weave; (c) bi-plane triaxial weave.

### 3.1.2. 브레이딩(Braiding)

브레이딩은 셋 이상의 섬유가 아래위로 교차하면서 직조되는 구조인데, 폭이 좁은 편평한 테이프 형태의 flat 브레이드와 속이 비어있는 튜브형 브레이드가 있다. 브레이드의 기하학적 패턴이 Figure 5에 나타나 있다. Figure 5 (a)는 두 섬유가 서로 2개씩 상하로 교차하는 2/2 형태이며 regular 혹은 plain 브레이드라고 한다. Figure 5 (b)는 1/1 반복구조를 가지며 diamond 혹은 basket 브레이드라고 한다. Figure 5 (c)는 regular 브레이드에 길이 방향 섬유가 보강된 세 방향 섬유로 구성된 구조로서 삼축 브레이드라고 하는데 길이 방향으로 보강이 되는 구조이다. 이 그림에서 비어 있는 공간은 패턴을 명확하게 보여주기 위한 것이며, 실제 복합재료로 사용되는 브레이드는 비어 있는 공간이 거의 없다.

앞장에서 설명한 제직 구조와 브레이드 구조는 2개 set의 섬유를 사용하는 것은 같으나 큰 차이는 제직 구조는 두 섬유가 서로 직교하며 거의 무한한 패턴을 가질 수 있는데 반해 브레이드의 경우에는 90도 보다 작은 각도(보통 30도 - 60도)를 이루며 패턴도 매우 제한적이다.

브레이딩은 원형 직기(braider)를 사용하여 제조되는데, 섬유가 장착된 캐리어(carrier)가 2개의 horngear에 의한 시계 및 반시계 방향으로 움직이며 교차함으로써 섬유가 서로 직조된다. 캐리어 수는 짝수이며 기계의 크기에 따라 보통 8개부터 4개씩 증가된다. 만약 캐리어 운동이 완전한 원을 그

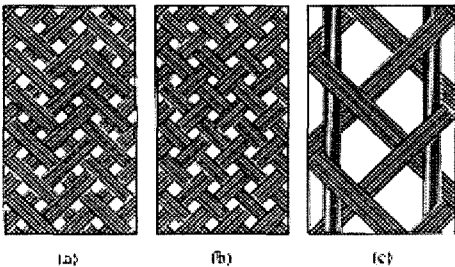


Figure 5. 브레이딩의 기하학적 형상: (a) regular (plain) 브레이드; (b) diamond (basket) 브레이드; (c) triaxial 브레이드.

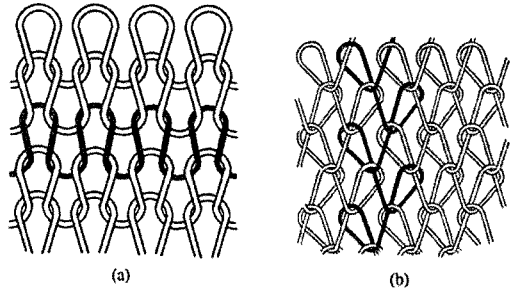


Figure 6. 니트 프리폼: (a) weft knit 구조; (b) warp knit 구조.

리지 않고 되돌아 오면 원형 브레이드가 아닌 flat 브레이드가 제조된다.

### 3.1.3. 제편(knit)

니트 구조는 루프(loop)를 이루는 것이 특징이며 루프를 형성하는 섬유가 진행되는 방향에 따라 워프니트와 경편 니트로 구별된다. 워프 니트에서는 Figure 6 (a)에서 보는 바와 같이 루프 섬유가 폭 방향, 즉 워프 방향으로 진행되며 루프는 단 하나의 워프 섬유에 의하여 형성된다. 워프 니트는 폭 방향으로의 변형이 잘 일어나지만 길이 방향으로는 다소 제한적인 변형을 줄 수 있다. 경편 니트(Figure 6 (b))에서는 루프가 형성되는 섬유가 길이 방향이며 하나의 수평 열을 이루는 모든 루프가 동시에 형성되는 구조이다. 이러한 니트 구조는 모든 방향으로 팽창이 가능하기 때문에 깊이가 깊은 부품 제조에 매우 유리하다. 폭 및 길이 방향의 특성 향상을 위해 보강섬유를 추가하는 경우도 있다.

## 3.2. 3차원 직조 프리폼

### 3.2.1. 3D 제직

3차원 제직 구조는 2차원 제직과 직조 방법은 유사하나 경사가 여러 층의 위사를 관통하여 두께 방향으로 배열된다는 점이 다르다. 3D 제직 프리폼은 연결(interlace)되는 층 수, 반복되는 패턴, 길이 방향으로 삽입되어 직선으로 배열되는 (in-laid) 섬유 유무에 따라 매우 다양한 기하학적인 형상을 가진

다. 이러한 다양한 구조 형상은 최종 복합재료의 구조적 특성에도 다양한 변화를 줄 수 있다. Figure 7은 대표적인 3D 제직을 보여주고 있는데, 충전섬유(stuffer) 층은 0도 방향, 위사(filler) 층은 90도 방향의 섬유 배열로 볼 수 있고 경사(warp weaver) 섬유는 이 여러 층을 두께 방향으로 연결/결합시키는 역할을 하고 있다.

Figure 7 (a)는 첫 번째 및 두 번째 위사 층이 경사로 연결되고 두 번째 및 세 번째 위사 층이 경사로 연결되어 한 층씩 두께 방향으로 계속하여 연결되는 구조이다. Figure 7 (b)는 전체 위사 층 및 충전 층을 전체 두께 방향으로 경사가 일정한 기울기를 가지며 관통하는 구조이다. Figure 7 (c)는 Figure 7 (b)와 같이 경사가 전체 두께를 관통하는 구조이나 다른 점은 직각으로 관통한다는 것이다. 이 세 가지 구조를 비교하면, LTL 및 ORT 구조는 TTT 구조에 비하여 전체적으로 밀집된 형태를 보이며 LTL 구조는 표면에 드러나는 루프가 가공으로 제거되더라도 내부 층은 결합되어 있기 때문에 나머지 구조에 비하여 각 층의 분리를 막는 데 더 유리하다고 볼 수 있다.

Figure 8은 평면적으로 도시한 Figure 7을 입체

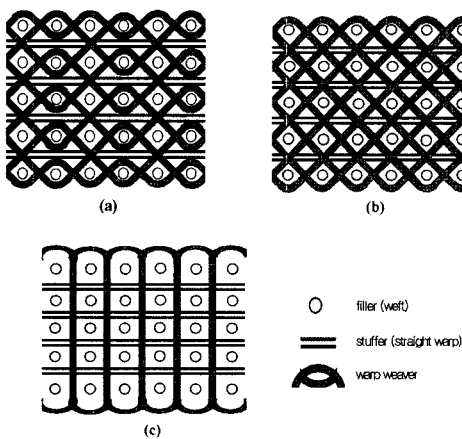


Figure 7. 단면으로 도시한 3D weave 패턴 종류: (a) layer-to-layer angle-interlock (LTL); (b) through-the-thickness angle-interlock (TTT); (c) orthogonal interlock (ORT).

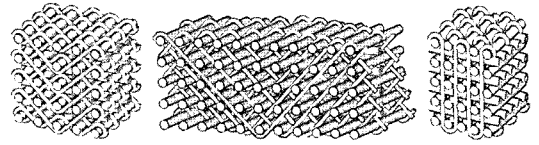


Figure 8. 입체적으로 도시한 3D weave 패턴 종류: (a) layer-to-layer angle-interlock (LTL); (b) through-the-thickness angle-interlock (TTT); (c) orthogonal interlock (ORT).

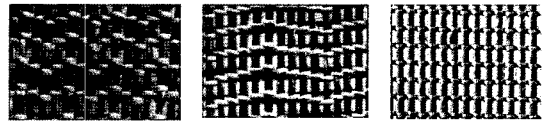


Figure 9. 표면에서 본 3D weave 패턴 종류: (a) layer-to-layer angle-interlock (LTL); (b) through-the-thickness angle-interlock (TTT); (c) orthogonal interlock (ORT).

적으로 보인 것으로서 3차원적인 섬유 구조를 분명하게 볼 수 있다. 3D 제직은 거의 무한에 가까운 패턴 종류를 얻을 수 있으나 복합재료에 사용되는 구조적 관점에서 보면 그 차이가 크지 않기 때문에 대체로 위에 설명한 구조에 국한되고 있다. 이 세 가지 구조는 그 표면을 보면 Figure 9에서 보는 바와 같이 그 차이가 분명하게 나타난다.

위에 설명한 3D 제직 구조는 섬유가 xyz 방향으로 3차원적으로 배열된 평판 형태의 프리폼으로서 기존 직기인 loom에 약간의 구조적 변경과 harness를 추가함으로써 제조할 수 있다. Figure 10에서 보인 것은 실린더 형태의 3D 제직 구조로서 이 프리폼을 제조하는 장비는 기존의 loom과는 전혀 다른 새로운 직조 방법을 적용한다. 즉 고정 배치된 rod 사이로 원주 방향의 섬유가 층 별로 배열되고 이 섬유와 rod 사이를 반경 방향의 섬유에 의해 편성되는 제조 방법을 사용하고 있다. 원하는 크기로 직조가 끝나고 rod를 제거하면 각 rod에 연결된 섬유가 삽입되어 전체 프리폼이 완성된다. 실린더형 직물은

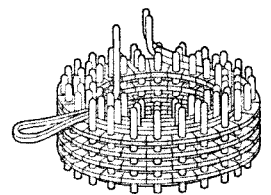


Figure 10. 실린더형 직물.

앞의 평판 형 3D 제직과는 달리 최종의 복합재료 형태에 맞게 제조할 수 있다.

### 3.2.2. 3D 브레이딩

3차원 브레이딩 프리폼은 둘 이상의 섬유가 공간적으로 서로 꼬여져서 일체화된 구조를 가진다. 일반적으로 알려진 형태로는 track과 column이 가로, 세로로 움직여서 4단계에 걸쳐 섬유가 서로 꼬여지는 4단(4-step) 브레이딩과 고정된 길이방향 섬유 사이로 브레이딩 섬유가 서로 대각선 방향으로 움직여 2단계에 걸쳐서 섬유가 꼬여지는 2단(2-step) 브레이딩이 있다. 4단 브레이딩에는 machine bed가 원형 형태와 직각형인 경우가 있는데 원형 브레이드는 튜브형 구조물을 만들 수 있고 직각형 브레이드는 solid 형태의 구조물 제작에 이용된다. 2단 브레이딩은 4단 브레이딩에 비하여 프리폼 제조 속도가 빠르고 길이 방향으로 섬유 포함량이 더 많기 때문에 그 방향으로 기계적 특성이 우수하다. 또한 2단 브레이딩은 다양한 단면이 가능하며 여러 가지 insert 구조를 넣어 전체 구조를 제조할 수 있으나 비교적 많은 양의 길이 방향 섬유로 인하여 굴곡이 있는 구조물 제조에는 불리하다. 3D 제직 구조는 주

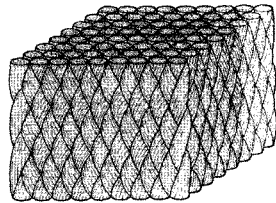


Figure 11. 3D 브레이드 구조 프리폼.

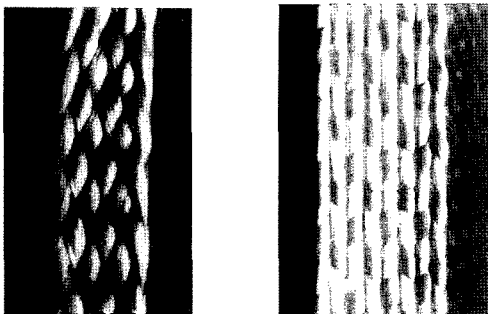


Figure 12. 12 3D 브레이드의 표면 패턴: (a) 4단 브레이드; (b) 2단 브레이드.

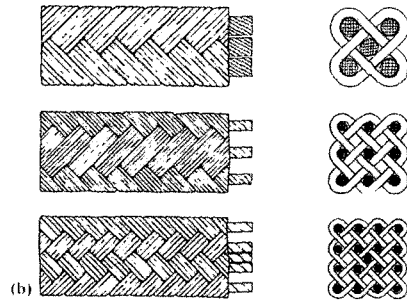


Figure 13. 다양한 단면의 solid 브레이드.

로 평판 형태의 복합재 제조에 응용할 수 있으나 3D 브레이드 구조는 폭이 제한되어 있기 때문에 빔이나 로드 형태의 복합재 제조에 적용될 수 있다. Figure 11은 4단 3D 브레이드 구조를 보여주고 있으며, Figure 12 (a), (b)는 4단 브레이드 및 2단 브레이드의 표면 패턴을 보인 것이다.

이와 같이 비교적 최근에 개발된 2단 및 4단 브레이딩 외에 maypole 형태의 브레이딩 기술을 이용하여, Figure 13과 같은 3차원 solid 브레이드를 제조할 수 있다. 이 방법은 직각형 및 원형 단면을 제조할 수 있으나 복잡한 형상의 단면 제조는 어렵다.

### 3.2.3. 3D 제편(knit)

여러 형태의 니트 프리폼 중 두께 방향으로 가장 높은 구조 일체를 주는 것은 다축경편(MWK, multiaxial warp knit)이다. 이 프리폼은 Figure 14에서 보는 바와 같이  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  및  $\pm\theta$ 의 각도를 가지는 섬유들이 두께 방향의 섬유로 일체화 된 구조이다. 섬유의 배열 각도 순서, 부가되는 부직포와 같은 재료 종류, 섬유 종류 등에 따라 매우 다양한 구조를 얻을 수 있다. 이 프리폼의 큰 장점은 제직 구조와는 달리 섬유의 굴곡이 없기 때문에 일방향 적층 복합재료의 장점을 그대로 살릴 수 있으며 두께 방

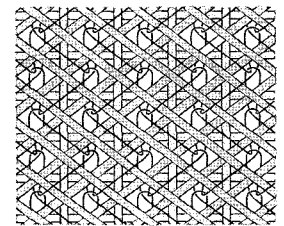


Figure 14. 다축경편 프리폼.

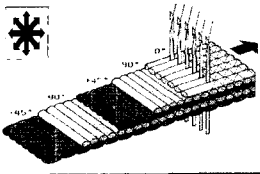


Figure 15. 다축경편 제조 개념도.

향의 섬유 관통에도 불구하고 스티칭(stitching)에서 나타나는 섬유 손상이 거의 없다는 점이다. 그러나, 대부분의 3D 니트 프리폼은 편성 섬유로 가는 폴리에스터 섬유를 사용하기 때문에 두께 방향의 결합 역할을 할 뿐이지 보강 역할은 미미하며, 일반적으로 섬유 층수가 6층 정도로 제한되는 단점이 있다. Figure 15는 다축경편 직물이 제작되는 방법을 보인 개념도이다.

3D 니트 프리폼은 기본 단위 층의 두께가 직포의 최소 2배 이상이기 때문에 대형 구조물 적층 시 제조 시간을 절약할 수 있고 절단 시 절단 부위에서 섬유의 이탈이 발생하지 않기 때문에 작업이 쉽다는 장점이 있어 대형 구조물인 선박 구조물 제조에 널리 사용되고 있다.

### 3.2.4. Needled 프리폼

이 프리폼은 순수한 3차원 프리폼은 아니지만 최종적인 형태는 두께 방향의 섬유가 보강된 구조이기 때문에 2.5 D 섬유 프리폼 이라고도 한다. 가장 일반적인 직조 기술은 스티칭(stitching) 및 니들 펀칭(needle-punching)이다. 이 둘의 차이점은 스티칭은 외부에서 섬유가 공급되는 반면, 니들 펀칭은 외부에서 섬유 공급 없이 바늘의 상하 운동에 의하여 평면에 배열된 섬유가 두께 방향으로 내려가서 층과 층을 결속시키는 방법이라는 점이다.

스티칭 기술은 보통 2차원 직물 프리폼이 여러 장 적층된 것을 두께 방향의 바늘 관통에 의하여 전체를 결속시키는 기술로서 매우 경제적으로 3차원 구조를 만들 수 있으나, 바늘 관통에 의해 적층 직물의 섬유 손상이 생기는 단점이 있다. 스티칭 섬유로는 인성이 좋은 아라미드 섬유나 유리섬유를 사용한다. 스티치 형태로는 록(lock) 스티치 혹은 체인(chain) 스티치가 있는데, Figure 16에서 보는 바

와 같이 록스티치의 경우에는 매듭이 프리폼 두께의 가운데 있는 경우(balanced)와 표면(unbalanced)에 있는 경우가 있다. 매듭이 표면에 오는 형태는 보빈 실이나 바늘 실에 걸리는 장력이 각각 다른 경우인데, 변형(modified) 스티치라고도 한다. 매듭이 가운데 오는 경우에는 매듭으로 인한 응력 집중이 생길 수 있고, 가장 큰 문제는 실에 걸리는 장력이 크기 때문에 표면에 큰 루프를 형성하여 수지 과다 지역이 생긴다는 것이다. 이러한 수지 과다 지역은 복합재료가 하중을 받게 될 때 크랙이 가장 먼저 발생하여 파손이 시작되는 지점이 될 수 있기 때문에 강도 면에서 나쁜 효과를 준다. 따라서, 복합재료에 사용되는 프리폼을 스티칭하는 경우에는 이러한 내외부의 큰 루프를 형성하지 않도록 하기 위하여 실에 걸리는 장력을 줄여 스티칭하는 변형 록스티치가 효과적이라고 알려져 있다.

록스티치는 기계의 아래나 위에서 공급되는 실이 필요하기 때문에 이 둘의 연동작동에 의하여 실에 루프가 생기는 형태이므로 이 둘의 작용을 떼어낼 수가 없다. 반면, 체인스티치는 보빈에서 공급되는 실이 필요치 않기 때문에 기구학적으로는 더 간단하다고 볼 수 있다. 그러나, 체인 스티치는 상하 두께 방향으로 압착력이 가해지지 않기 때문에 다소 느슨한 구조이며 스티치 된 실을 잡아당기면 빠져 나오므로 복합재료 성형 전까지 실이 풀리지 않도록 주의를 기울여야 한다.

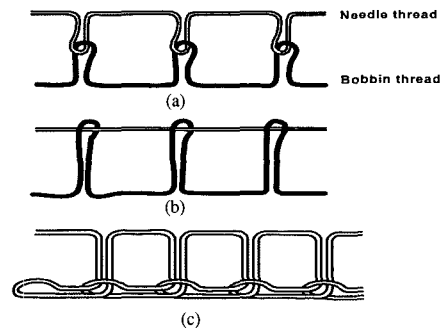


Figure 16. 스티치 형태: (a) balanced lock stitch; (b) unbalanced lock stitch; and (c) chain stitch.

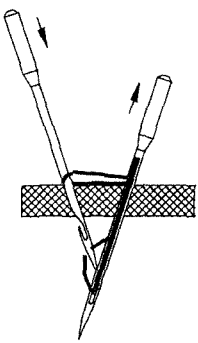


Figure 17. OSS 방법의 스티치 형성.

실이 풀어질 수 있는 체인 스티치의 단점을 보완한 것으로서 one side stitching (OSS) 기술이 있다. 이 방법은 Figure 17에서 보는 바와 같이 한 면에서 두 개의 바늘(보통의 바늘과 이것을 잡아주는 바늘)이 출입하는 것으로서 두 바늘이 만나는 지점은 스티칭하고자 하는 직물 하부의 아래에 있다. 이

방법으로 스티칭된 프리폼 모습이 Figure 18에 있다. 스티칭은 볼트나 접착제에 의한 접합을 하지 않고 구조물 간의 결합을 위해 사용하는데 매우 큰 장점을 가진다. 앞서 설명한 3D 제직이나 3D 브레이딩의 경우에는 제조하고자 하는 구조물의 형상에 맞게 직조 장비를 설계하거나 미리 섬유를 배열해야 하나 스티칭의 경우에는 일부 구조에 대한 완성된 프리폼 여러 층을 스티치 섬유로 서로 연결시켜주기 때문에 전체 구조물의 형상에 구애받지 않고 제조 시간도 매우 단축된다. Figure 19는 stiffened panel인데 바닥의 평판과 위를 직각으로 보강하는 부재가 일체형으로 결합된 형태이다. 실제로 항공

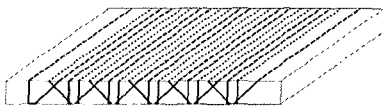
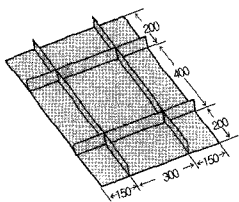


Figure 18. OSS 방법에 의한 평판 스티칭 단면도.

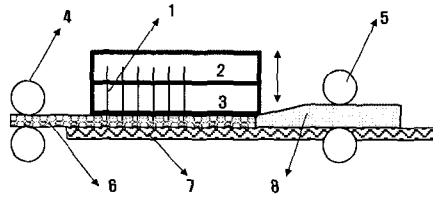


(a)



(b)

Figure 19. (a) Stiffened panel 프리폼; (b) preform 크기.



- ① needle, ② punching head, ③ guide plate,
- ④ take-up roller, ⑤ guide roller
- ⑥ punched preform, ⑦ machine bed
- ⑧ preform prior to punching

Figure 20. Needle punching 원리.



- ① crank, ② shank,
- ③ working part, ④ barb
- ⑤ point

Figure 21. 펀칭 바늘.

기 구조물에서 이와 유사한 구조가 동체 부위 구조인데, 경우에 따라서 가운데 부위를 도려내어 창문 구조물로 사용할 수 있다. 여기서 보는 바와 같이 평판 형태의 프리폼과 수직 형태의 프리폼 스티칭 기계에 의하여 서로 일체화 됨을 알 수 있다.

나들 펀칭 기술은 바늘의 펀칭에 의하여 평면으로 배열된 섬유들을 강제적으로 두께 방향으로 배열시켜 층간 결속을 주는 방법이다. 기본 원리는 Figure 20에서 보는 바와 같이 펀칭하고자 하는 재료를 상하 왕복 운동하는 바늘 아래로 통과시키면 Figure 21에 도시된 바늘의 미늘이 섬유를 걸어 아래로 내려가고 바늘이 위로 운동할 때는 미늘에 섬유가 걸리지 않기 때문에 바늘만 빠져 나오고 섬유는 두께 방향으로 배열된다. 이 방법의 장점은 직물 몇 장을 추가적으로 적층하여 펀칭할 수 있기 때문에 최종 프리폼의 두께에 제한 없이 경제적으로 제조할 수 있다는 것이다. 그러나 사용할 수 있는 직물 형태도 펠트처럼 불연속 섬유를 사용하기 때문에 기계적 특성이 연속 섬유보다 떨어지며 반복적인 펀칭에 의하여 프리폼에 상당한 손상이 있다는 단점이 있다.



#### 4. 섬유 복합재료 제조기술

고성능 복합재료를 제조하는 방법에 대해 알아보기 전에 복합재의 기계적인 특성을 좌우하는 요인에 대해 살펴보기로 한다. 복합재료의 기계적인 강도를 좌우하는 것은 보강 섬유의 종류, 섬유 포함량 및 섬유 배열 방향 등이다. 고분자 복합재료의 보강 섬유로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드 섬유 등이 주로 사용되고 있으며 복합재료가 사용되는 조건이나 제조 조건 혹은 가격 등에 따라 적절하게 선택된다. 유리섬유의 강도와 탄성계수를 각각 1이라고 할 때 탄소섬유는 약 3배, 1.7배이며, 아라미드 섬유는 2배 및 1.5배 정도이다. 복합재료의 기계적 특성은 보강 섬유의 양에 의해 결정되는데, 탄소섬유/에폭시 복합재료의 경우 탄소섬유가 에폭시보다 강도 및 강성이 50배 이상이다. 따라서, 복합재료에 들어있는 섬유량은 높을수록 좋다. 그러나, 이론적으로 모든 섬유가 서로 완벽하게 인접해 있다고 가정할 때 섬유체적비율이 약 0.9이며 실제로 상업화되고 있는 복합재료의 제조 가능한 최대 섬유체적비율은 0.7 정도이다. 이 정도의 섬유체적비율을 가지려면 점성이 물의 1000배 이상 높은 고분자 수지를 보강섬유 사이로 밀어 넣기 위해 매우 높은 압력이 필요하다. 높은 성형 시설비나 엄격한 공정을 관리함으로써 이 일이 전혀 불가능하지는 않지만, 높은 비용을 들면서까지 고성능 복합재료를 만들 필요는 없을 것이다. 또한, 섬유가 너무 많아지게 되면 기지 재료가 가지는 중요한 특성의 하나인 힘을 분산, 전달하는 능력이 떨어지므로 복합재료의 파괴 양상이 매우 급작스럽게 일어나는 단점이 있다. 실제로는 고성능 복합재료의 경우 체적비율이 0.5 이상으로써, 섬유가 차지하는 체적이 고분자가 차지하는 체적보다 높아야 한다.

섬유 방향도 복합재료의 강도를 좌우하는 큰 요인인데, 예를 들어, 탄소섬유는 섬유 길이 방향의 탄성계수가 폭 방향 보다 10배 이상이며, 섬유가 한 방향으로 배열된 탄소섬유/에폭시 복합재료의 경우

강도나 강성은 섬유 길이 방향이 폭 방향 보다 30배와 15배 이상 차이가 난다. 따라서, 어떤 구조물이 외부의 힘을 받을 때 각 부위에 가해지는 힘의 방향과 크기를 알고 있으면 적정량 혹은 두께의 복합재료를 필요한 부위에 배치하고, 힘이 주로 가해지는 방향과 섬유 방향을 일치시킨다면 최소의 재료로서 가장 효과적인 구조물을 만들 수 있다. 이것은 마치 양복점의 재봉사가 우리 몸에 꼭 맞게 옷을 맞추는 것과 같다고 하여 복합재료를 맞춤설계 혹은 재단설계(tailored design) 할 수 있다고 일컬어지고 있다. 이와 같이 방향에 따라 재료의 성질이 다른 복합재료를 이방성 재료라고 하며, 금속재료나 플라스틱 재료 등은 재료 성질이 방향에 따라 달라지지 않으므로 등방성 재료라고 한다. 이방성 재료가 재단설계가 가능하다는 장점이 있지만 설계자에게는 부담이 될 수 있다. 즉, 등방성 재료는 한 방향으로 당길 때, 길이 방향으로 늘어나고 폭 방향으로 줄어들이지만 비틀림은 일어나지 않는다. 그러나, 이방성 재료의 경우는 길이 및 폭 방향의 변형과 함께 비틀림도 동시에 발생하기 때문에 재료의 거동에 대하여 충분한 확인을 하기 위해서는 여러 방향 및 가해지는 힘의 종류에 따른 재료 물성치가 모두 필요하다는 점이다.

복합재료의 성능 향상을 위해서는 보강섬유가 가장 중요한 인자이다. 보강섬유의 종류는 선택의 범위가 비교적 제한되어 있고, 섬유체적비율도 0.5 이상의 수준이면 만족할만하다고 볼 수 있기 때문에 가장 큰 고려 대상은 섬유 배열이다. 이 문제는 복합재료가 받는 힘이 주로 평면 방향이면 Figure 1과 같은 적층 형태가 좋다. 즉, 여러 방향으로 힘을 받아야 하는 구조물에 복합재료를 사용하기 위해서는 한 방향의 섬유로 구성된 층(ply)을 여러 각도로 쌓아 올라가는 적층 구조의 형태를 가지게 된다. 그러나, 이러한 적층 복합재료는 평면 내에서는 강도가 우수하나 두께 방향으로 층과 층 사이를 보강하는 섬유가 없기 때문에 두께 방향의 하중이 가해질 때 층과 층이 갈라지는 층간분리(delamination)

현상에 의해 쉽게 파손이 일어난다. 만약 이와 같이 두께 방향의 힘도 중요하다면 두께 방향의 섬유가 배열된 구조인 3차원 직물 복합재료가 바람직하다. 이 새로운 재료의 두드러진 특징은, 섬유가 3차원적으로 배열되어 있기 때문에 층간분리가 일어나지 않으며, 구조의 두께 방향 및 폭 방향의 강도 및 강성이 증가하고 인성이 높아서 손상허용치가 증가하며 재료의 내구성 및 신뢰성이 향상된다는 점이다. 또한, 제조하고자 하는 제품의 크기와 거의 같도록 제조된 3차원 직물로부터 복합재료가 제조되기 때문에 기계 가공이나 체결을 할 필요가 줄어들어 재료 손실이 적으며, 직조로부터 복합재료까지의 전 과정을 자동화할 수 있어서 제조 원가가 낮아질 수 있다는 이점이 있다. 이러한 3차원 복합재료는 반드시 대형 구조물에만 필요한 것은 아니고 크기가 작더라도 다양한 방향으로 하중이 작용되는 중요한 부품이라면 이러한 3차원 섬유 배열 구조가 필수적이다.

섬유 프리폼을 사용하여 제품의 크기에 큰 제약을 받지 않고, 생산비가 저렴한 복합재 구조물 제조법으로서 최근 많은 관심을 끌고 있는 것이 액상 성형법의 하나인 수지충전 성형법(RTM, resin transfer molding)이다. 이 방법은 Figure 22에 보인 바와 같이, 어떤 형태를 갖추도록 적층하거나 형태를 미리 잡아 놓은 보강재를 금형 내부에 넣고 수지를 주입하거나 진공에 의해 수지를 빨아들이는 성형법이다. 그다지 높은 압력을 필요치 않으므로(진공압 혹은 4.5 기압 정도) 금형이 간단하고 큰

시설비를 필요로 하지 않는다. 이 성형법에서 중요한 것은 보강재에 수지가 차지 않는 부분이 없어야 하고 기포가 거의 없어야 한다는 점이다. 수지가 금형 내부에서 충전되어 가는 과정을 알기 위해서는 보강재의 섬유 구조에 따라 수지 흐름이 어떻게 달라지는지 실험으로 수지 유동 특성을 구해야 하고, 수지 자체의 점도 변화도 알아야 한다. 또한, 금형 내부에서 수지가 어떻게 흘러가는지 미리 예측하는 기술이 매우 중요한데, 그 이유는 수지를 주입하는 구멍과 수지가 배출되는 구멍의 개수 및 위치에 따라 수지 유동이 달라지므로, 수지가 금형 내부를 모두 채우는지 아니면 어디에 기포가 생기는데 대한 해석을 함으로써 금형 설계를 위한 자료로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라 공정 순서를 결정하는 데 반드시 필요하기 때문이다.

수지 유동을 해석하는 기법은 기존의 2차원 유동 해석에서는 주로 평판 유동에 국한되어 있지만 부품이 두꺼운 경우에는 수지 유동이 평면 뿐 아니라 두께 방향으로도 일어나기 때문에 3차원 유동 해석이 수행되어야 한다. 이러한 수지 유동 해석은 사용하기 쉽게 코드화되어 사용자에게 제공될 수 있다. 한편, 이와 같은 액상 성형을 할 때 필요한 변수는 수지 및 금형의 온도, 수지의 주입 압력, 수지가 어느 정도 화학 반응을 일으켰는지에 대한 경화 정도 등을 들 수 있는데, 성형 중에 발생하는 이러한 변수의 변화를 실시간 확인하여 이 변수가 우리가 원하는 최적의 공정을 따라 가는지 확인하고 만약 이 조건에서 벗어나면 수정을 가하여 최적의 공정이 수행되도록 한다. 이러한 기술이 실현되기 위해서는 최적공정 모델을 개발해야하고 성형 변수들을 실시간으로 감지하고 모니터링 할 수 있는 기술, 또한, 이 전체를 통합하여 원활하게 제어할 수 있는 기술이 필요하다.

액상성형법은 고성능 복합재의 대표적 성형법인 오토클레이브(autoclave) 성형법에 비하여 시설 투자비가 매우 낮고, 생산성이 높으며, 제품 크기에 한계가 없기 때문에 선진국에서는 80년대 초부터

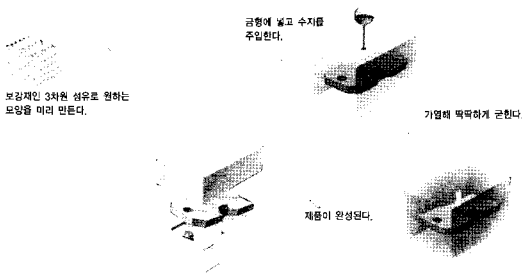


Figure 22. 수지충전 성형법.

고품질을 요구하는 항공 산업을 중심으로 종래의 성형 방법에 대한 대체 성형법으로 지난 10여년 동안 꾸준히 연구가 진행되었으며, 현재 많은 제품들에 대한 대체 공법이 이미 개발되었거나 진행되고 있다. 또한, 현재 대형 복합재 구조물을 제조하는데 널리 적용되고 있는 수적층법(hand layup)이나 스프레이 성형법은 노동집약적이고, 제품 제조시간이 길며, 원재료의 낭비가 심하다. 또한, open mold 성형법이기에 때문에 VOCs(volatile organic compounds) 방출 등으로 작업 환경이 나빠지며 작업자의 숙련도에 따라 제품의 품질이 좌우된다. 그러나 액상성형 기술은 압수 금형이나 진공 bag을 사용하는 closed mold 성형이므로 대기 중 VOC 방출이 매우 낮고 scrap rate를 최소화 할 수 있기 때문에 환경에 대한 충격을 최소로 할 수 있으며 공정의 최적화, 표준화, 양산화가 용이하다.

이러한, RTM 공정은 전술한 여러 가지의 이점 때문에 최근 많이 사용되고 있으나, 대형 부품의 성형, 섬유분율의 증가 등 몇 가지 점에서 그 한계를 드러냈다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 여러 가지 대안이 마련되었는데, 그 중 대표적인 것이 SCRIMP(Seemann Composites Resin Infusion Molding Process)공정이다. Figure 23에 나타낸 SCRIMP 공정에서는 수지의 유동을 돕기 위하여 프리폼 위에 다공질 수지 유동층을 하나 더 두면 주입된 수지는 프리폼 위의 다공질 수지 유동층으로 먼저 흘러들어가면 프리폼으로 스며들게 되는데, 이렇게 하면 수지의 유동 거리가 훨씬 짧아져 수지

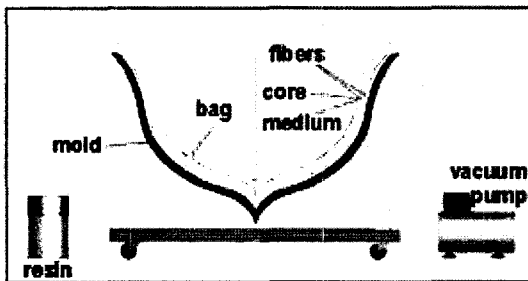


Figure 23. SCRIMP 공정 개략도.

주입 시간을 획기적으로 개선할 수 있어 대형 부품의 성형에 적합하다.

### 5. 결 론

현대에 급속하게 진행된 산업화는 제품에 대한 경량화, 부식에 대한 안정성, 전기 절연성 등 다양한 기능성과 기존의 기계적 고성능 특성을 동시에 요구하고 있다. 이에 가장 잘 부응하는 재료로 현재 널리 각광받고 있는 고분자 복합재료는 최소한의 무게로 높은 강도를 얻을 수 있기 때문에 경량화가 가능하고, 제품 설계에 대한 유연성이 높아 부품 수를 줄임으로써 부품 일체화를 통한 생산성 향상이 가능하며 치수 안정성도 좋다. 또한, 피로 수명이 길고 내식성 및 전기절연성에서도 뛰어난 장점이 있어, 항공 우주 분야, 수송기기 분야, 스포츠 레저 분야 등 전 산업 분야에 걸쳐 적용되고 있으며, 수요가 더욱 증가할 것으로 예상된다.

특히, 복합재료 전체 시장의 반 이상을 차지하고 있는 육상교통, 토목/건축, 선박/해양 분야의 산업계에서는 복합재료 대형 구조물에 대한 수요가 증가하고 있으나 기존의 복합재료 제조 방법인 오토클레이브 제조법이나 수적층법으로는 이러한 대형 구조물을 빠른 시간 내에 제조한다는 것은 불가능하다. 또한, 형상이 복잡하거나 대형인 구조물을 제조하기 위해 작은 부품들을 조립하거나 체결하는 과정을 거치게 되면 생산 시간이 늘어날 뿐만 아니라 체결 나사 등으로 인한 중량이 증가하고 체결 부위에 힘이 집중되어 성능에 문제가 발생할 수 있기 때문에 구조 일체를 통한 성형 기술이 필요하다.

직조형 복합재료는 직조 기술을 통해 만들어진 프리폼을 사용한 고성능 구조용 복합재료로서, 섬유 자체의 경량 특성, 유연성, 강도 및 인성 등이 조합된 특수한 성질과 함께, 층과 층 사이 강도의 현저한 향상과 내충격 및 내손상이 뛰어난 보강 구조에 대한 요구를 만족시켜줄 수 있는 재료이다. 대형 구조의 부품에 복합재료의 적용이 확대됨에 따

라 성능 향상 뿐 아니라 구조의 일체화 기술 및 최종 제품의 형상에 가까운 제조 기술의 가능성으로 인하여 생산성 향상에도 크게 기여를 할 수 있기 때문에 여러 분야에서 섬유 복합재료의 요구가 증대되고 있다. 직조형 복합재료는 구조물로서의 성능 조건을 만족시키기 위하여 프리폼의 미세 구조를 설계할 수 있고, 섬유 기술에 의해 최종 제품 형상으로 제조하거나, 특별한 형상이나 크기로 가공될 수 있는 가능성이 있기 때문에 낮은 생산 비용으로

고성능 복합재료를 제조할 수 있는 유일한 복합재료이다. 따라서, 직조형 복합재료 기술의 완성도를 높이기 위해서는 프리폼의 획득 가능성, 비용, 복합재 제조의 용이성, 기계가공이나 부품 접합 등과 같은 2차적인 작업의 필요성 및 구조적인 성능 등에 대한 전반적인 고려를 통하여 여러 가지 요구조건을 최적화 할 수 있는 전체 시스템적인 접근 방법이 필요할 것이다.

저자 프로필



변 준 형

1976-1980. 한양대학교 정밀기계공학과 졸업  
 1980-1982. 한국과학기술원 생산공학과(석사)  
 1986-1992. 미국 델라웨어대학교 (Univ. of Delaware) 기계공학과 박사  
 1982-1986. 한국과학기술연구원 기계공학부 연구원  
 1992-1993. 미국 델라웨어대학교 복합재료센터 Post Doc.  
 1993-현재. 한국기계연구원 책임연구원



엄 문 광

1988-1995. 서울대학교 기계공학과 학사/석사/박사  
 1998-1999. 미국 Northwestern 대학교 Post Doc.  
 1995-현재. 한국기계연구원 책임연구원